第 38 卷第 5 期 生 态 学 报 Vol.38,No.5
2018 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2018

DOI:10.5846/stxb201703060365

王新源,陈翔舜,丁乾平,赵学勇,王小军,马仲武,连杰.不同荒漠化阶段植被生态特征对土壤环境因子的响应——以民勤荒漠绿洲过渡带为例.生态学报,2018,38(5):1569-1580.

Wang X Y, Chen X S, Ding Q P, Zhao X Y, Wang X J, Ma Z W, Lian J.Vegetation and soil environmental factor characteristics, and their relationship at different desertification stages: a case study in the Minqin desert-oasis ecotone.Acta Ecologica Sinica,2018,38(5):1569-1580.

不同荒漠化阶段植被生态特征对土壤环境因子的响应
——以民勤荒漠绿洲过渡带为例

王新源[1,2],陈翔舜[1],丁乾平[1],赵学勇[2],王小军[1],马仲武[1],连　杰[2,*]

1 甘肃省生态环境监测监督管理局, 兰州　730020

2 中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站, 兰州　730000

摘要:荒漠绿洲过渡带是荒漠化和绿洲化两种地理过程共同影响的生态交错区,是恢复生态学重点关注的区域。利用第五次全国荒漠化和沙化监测数据,采用方差分析和冗余分析,研究了民勤荒漠绿洲过渡带 4 种不同荒漠化发展阶段的植被生态特征和土壤环境因子的变化规律与相互关系。结果表明:(1)随着荒漠化的发展,土壤环境因子中,除有效土层厚度逐渐变浅外,风蚀痕迹占地率、表土砾石含量、盐碱斑占地率和坡度均呈现增加的动态趋势;植被因子中,除优势种盖度与植被总盖度的比值逐步增加,物种丰富度、优势种多度等其他指标均表现出明显的下降特征;(2)土壤环境因子中,有效土层厚度在 4 种荒漠化阶段对植被生态特征的影响程度达显著水平(P<0.05),风蚀痕迹占地率在轻度、中度和重度阶段是植被生态特征变化的主导驱动因子。其他因子在多数荒漠化阶段与植被生态特征相关性不显著;(3)相比其他荒漠化阶段,中度阶段中植被生态特征对土壤环境因子的响应更加敏感,应是荒漠化防治重点关注的阶段。

关键词:荒漠绿洲过渡带;荒漠化发展阶段;植被因子;土壤环境因子;冗余分析

Vegetation and soil environmental factor characteristics, and their relationship at different desertification stages: a case study in the Minqin desert-oasis ecotone

WANG Xinyuan[1,2], CHEN Xiangshun[1], DING Qianping[1], ZHAO Xueyong[2], WANG Xiaojun[1], MA Zhongwu[1], LIAN Jie[2,*]

1 *Ecological Environmental Supervision and Administration Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730020, China*

2 *Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

Abstract: The desert oasis ecotone is a ecological zone influenced by desertification and oasisization, and is a major research focus for restoration ecology. Based on the fifth national desertification monitoring, our research used variance analysis and redundancy analysis to study the relationships between vegetation ecological characteristics and soil environmental factors at four different desertification developmental stages in the Minqin Desert Oasis Transition Zone. The results showed that (1) with the development of desertification, all the soil environmental factors, such as occupancy rate of wind erosion, topsoil gravel content, and saline-alkali spots, showed an increased dynamic trend, while the effective soil thickness showed a decreased dynamic trend. Among the vegetation factors, species richness, total vegetation coverage, shrub coverage, herb coverage, dominant species coverage, plant height, and abundance decreased significantly, whereas the ratio of dominant species coverage to total vegetation coverage increased gradually; (2) among the soil environmental

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0500907);中国科学院率先行动"百人计划"(Y551821002);国家自然科学基金(41471083, 41501572);中国科学院战略性先导科技专项专题(XDA05050406-4);国家财政专项"第五次全国荒漠化和沙化监测"

收稿日期:2017-03-06;　　**网络出版日期**:2017-11-21

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lianjeco@ outlook.com

factors, the effects of the effective soil layer thickness on vegetation ecological characteristics at the four stages of desertification were significant; the occupancy rate of wind erosion was the dominant driving factor behind the variation in the vegetation ecological characteristics at the mild, moderate, and severe stages, but other factors were not correlated with vegetation ecological characteristics for most desertification stages; and (3) compared to the mild, severe, and extremely severe desertification stages, the response of vegetation ecological characteristics to soil environmental factors was more sensitive at the moderate stage and it should be the focus for desertification control.

Key Words: desert-oasis ecotone; desertification stage; vegetation factors; soil environmental factors; Redundancy analysis

荒漠绿洲过渡带是荒漠生态系统和绿洲生态系统共同影响的生态交错区,在维持绿洲稳定和遏制荒漠化方面具重要作用[1-2]。荒漠绿洲过渡带受荒漠化和绿洲化两种陆表过程的作用,物质和能量交换频繁且复杂,从而形成了多样的生物群落分布格局[3-4]。相较其他生态系统,荒漠绿洲过渡带群落结构简单,但小气候变化剧烈,植物功能群类型相对集中,微尺度下生境异质性明显,生态功能稳定性较差,已成为生态学研究的重点区域。

荒漠化是荒漠绿洲过渡带最为严重的生态问题,其实质是土地退化,主要表现为土地生产力降低、物种多样性减小和生态系统恢复力下降等[5-6]。在生态脆弱的荒漠绿洲过渡带,荒漠化对生态环境的影响是一个动态的过程,不同的荒漠化发展阶段导致不同的土壤环境特征,相应的,植被组成和群落结构也存在差异。土壤是植被生长繁衍的载体和物源基础;植被是促进土壤发育、改善土壤质量的生物驱动力,两者相互影响、相互限制与相互协同,共同构建了荒漠化过程的生态演替格局。因此,以植被因子与土壤环境因子为研究对象,系统分析不同荒漠化阶段荒漠绿洲过渡带的生态系统协同演变规律,是构建稳定荒漠绿洲生态系统的理论基础。

位于河西走廊的民勤绿洲属于我国典型的荒漠绿洲过渡带,近年来已积累了大量的研究成果。在种群组成和群落分布方面的研究多围绕植株个体[7]、优势种种群特征和演替规律[8-10]等开展;在生态服务和生态安全方面的研究主要聚焦于水资源利用与保护[11-13]、生态承载力[14-15]和生态系统服务功能[16-18]等内容;在土地利用类型方面,关注点多集中于人类活动和管理方式的影响,不同的人为干预或管理措施造成不同的土地利用类型,在此基础上,分析不同土地利用类型下资源消耗情况与生态格局[12,19-20];然而,整体上尚缺乏不同荒漠化发展阶段植被与土壤环境因子间相互关系及变化规律的研究。目前,植被的恢复重建与生态服务功能的维持是该区域荒漠化治理的主要方向和目标,而剖析各荒漠化阶段植被与土壤环境因子的关联特征有助于筛选影响民勤地区植被生长分布的关键土壤环境因子,有助于确定荒漠化防治中需要重点关注的关键阶段,使防治工作做到有的放矢。鉴于此,本研究依托于全国第五次荒漠化和沙化监测项目,将民勤荒漠绿洲过渡带划分为轻度、中度、重度、极重度等不同的荒漠化发展阶段,并对相应的植被与土壤要素变化进行定量研究,运用数量生态学方法,系统分析物种分布、土壤环境要素在荒漠化过程中的内在联系,以期为民勤荒漠绿洲生态系统荒漠化防治和植被恢复重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省民勤县境内的石羊河下游区域,西北部为巴丹吉林沙漠,东接腾格里沙漠西缘,属于我国典型的荒漠绿洲过度带,地理位置 38°10′N,104°12′E,平均海拔约为 1300m(图 1)。该区域属于典型的干旱荒漠化气候,年均温 7.8℃,大于 10℃年有效积温 3400℃,年日照时数 2730h,年均降水量 116.5mm,年蒸发量达 2380mm,年平均风速 2.5m/s,其中风速大于 17m/s 的大风天达 28.3d。地貌类型以连绵起伏的流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘及交错分布的戈壁、荒漠草地为主要特征。植被主要有白刺(*Nitraria tangutorum*)、

盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、芦苇(*Phragmites communis*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和柽柳(*Tamarix chinensis*)等。目前,由于水资源的严重短缺、人口压力持续增加,不合理的土地利用方式以及欠科学的防治措施等多种因素的共同驱动[21-24],研究区域内大面积土地仍处于荒漠化的消长过程中,逐步形成不同土地荒漠化的发展阶段。

1.2　样点设置和数据收集

样地选择和荒漠化发展阶段确定以《第五次全国荒漠化和沙化监测技术规定》(下文中简称为《规定》)[25]为依据,共划分 4 个荒漠化水平,即轻度荒漠化阶段、中度荒漠化阶段、重度荒漠化阶段和极重度荒漠化阶段,其中轻度样地 76 个、中度样地 293 个、重度样地 180 个、极重度样地 25 个,所选样地具有均一化的地貌特征和群落组成,且使用全球卫星定位系统记录其所在坐标(图 1)。

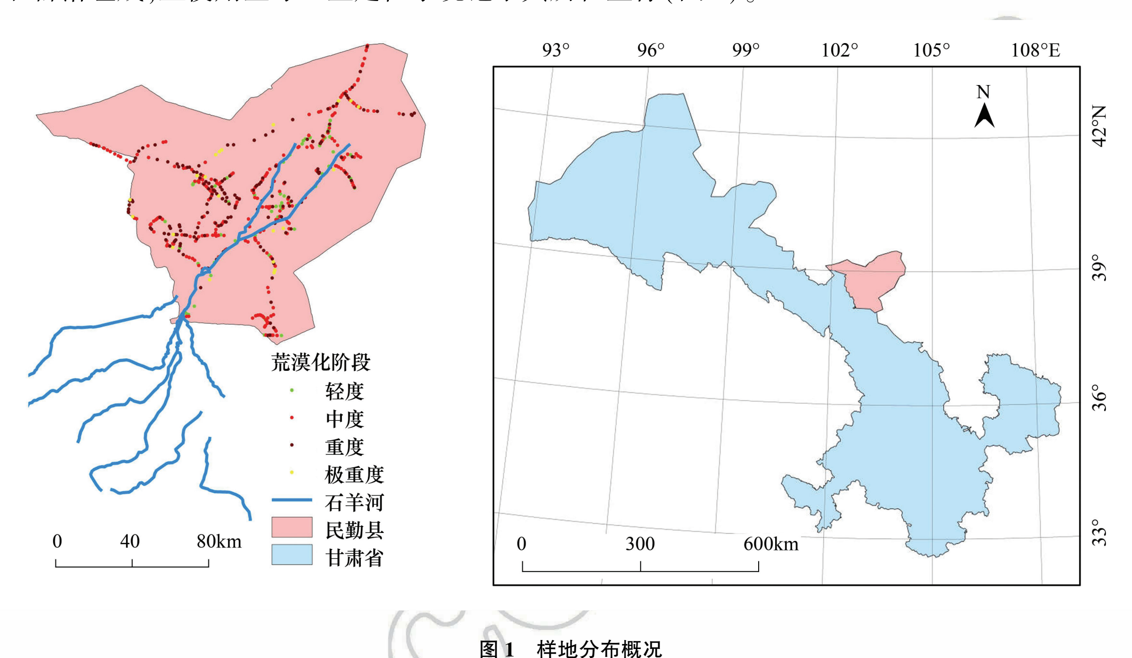


图 1　样地分布概况

Fig.1　Distribution of sites

植被调查和数据收集选择在植物生长季进行,于 2014 年 7 月上旬至 10 月中旬完成,在每个样地的代表性地段选取 3 块 20m×20m 的样点,优势种一致且确保各样点间存在 10m 的隔离区。在每个样点内,随机设置 3 个 5m×5m 的样方,调查指标包括物种丰富度、优势种种名、优势种多度、优势种株高,优势种盖度、草本植被盖度、灌木盖度和植被总盖度等。同时在每个样方内测定部分土壤环境指标,主要方法有,风蚀痕迹占地率和植被生长状况参考《规定》[25],使用现地目测和拍照解译结合的方法,分别做定量和定性处理;土壤质地采用手测法(揉条湿测法);有效土层厚度和表土砾石含量均使用随机取样方法,重复数为 3,其中有效土层包括表土层和心土层,其厚度应用土钻取样法测得;表土砾石含量运用土钻钻取 0—10cm 土样并在室内过筛后采取排水法获得;坡度使用坡度计测定;盐碱斑占地率采用拉绳目视法获得。

将植被生长状况分为 3 个类别,分别用 G、M、P 标示,具体如下:

G:生长旺盛,发育良好,枝干发达;

M:生长受到环境轻度阻碍,但各器官健全,发育正常或轻度受限;

P:难以达到正常生长状态,发育严重受限。

土壤质地做定性化处理,样地中有砂土、壤砂土和砂壤土 3 种类别,分别用 S、LS 和 SL 标示(由于本研究区内未测得壤土和粘土,故不再标示与分析)。

物种丰富度指数:$R = S$

式中,R 为群落的物种丰富度指数;S 为群落内物种总数。

1.3 数据处理

数据分析与处理采用 EXCEL 2013 和 SPSS 20.0 软件,图形绘制由 ORIGINAL 8.5 完成,应用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同荒漠化阶段土壤环境因子和植被因子进行差异显著性分析($\alpha=0.05$),使用最小显著极差法(LSD)进行多重比较。

应用 CANOCO4.5 分析植被指标与环境因子间相关关系。首先对数据进行除趋势对应分析(DCA),所得排序轴梯度长度(LGA)能够反映植被指标的变化程度。当 LGA<3 时,数据适用于线性模型;LGA>4 时,适用于单峰模型;LGA 介于 3 和 4 之间时,两种模型均适用[26]。本研究中轻度、中度、重度和极重度 4 个荒漠化阶段各排序轴 LGA 最大值分别是 0.573、0.786、0.96 和 0.748,均小于 3,表明环境因子与植被指标间存在较好的线性关系,宜采用线性模型。冗余分析(RDA)是基于线性模型的多变量直接梯度分析,通过分析变量集间的线性关系,能够直观的反映环境因子对植被分布的解释能力[27]。因此,本研究采用冗余分析(RDA)来表征环境因子与植被因子间的相关关系,分析时所用原始数据均进行 Log 转换,并采用向前筛选法(Forward selection)和蒙特卡洛置换检验(Monte Carlo permutation test)进行环境因子筛选和显著性检验[28]。

2 结果与分析

2.1 不同荒漠化阶段优势种分布及定性指标特征

荒漠化发展阶段不同,优势种类型亦不同。对不同荒漠化阶段各样地优势种进行统计(表 1),结果表明,轻度阶段优势种主要为多年生草本植物和灌木,其中以芦苇、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、柽柳、梭梭及白刺为优势物种的样地共计 50 个,占轻度荒漠化样地数的 65.79%。随着荒漠化发展至中度阶段,优势种为白刺、梭梭、红砂和盐爪爪的样地总计 243 个,占该阶段样地总数的比例为 82.94%。总体来看,中度阶段各样地中灌木占主导地位,多年生草本植物趋于退化。重度阶段主要优势物种类似于中度阶段,其中白刺(81 个)的重要性尤为突出,占重度荒漠化样地总数的 45%。当荒漠化发展至极重度阶段,多年生草本植物已无法构建群落,样地优势种为一年生草本植物与灌木,沙米和白刺样地分别占该阶段样地数的 32% 和 24%。综合发现,白刺在荒漠化不同演替阶段的部分样地中均为优势种,表明白刺在民勤荒漠绿洲过渡带的生态位宽度较大,相较其他物种有更强的抵御环境胁迫和维持种群稳定的能力。

表 1 不同荒漠化阶段优势种分布

Table 1 Distribution of dominant species in different desertification stages

物种序号 Serial number	优势种 Dominant species	轻度荒漠化 Mild desertification	中度荒漠化 Moderate desertification	重度荒漠化 Severe desertification	极重度荒漠化 Extreme desertification	生长型 Growth form
1	白刺 *Nitraria tangutorum*	11	95	81	6	灌木
2	梭梭 *Haloxylon ammodendron*	13	88	43	3	
3	霸王 *Sarcozygium xanthoxylon*	1	2			
4	柽柳 *Tamarix chinensis*	14	11			
5	膜果麻黄 *Ephedra przewalskii*		2	1		
6	红砂 *Reaumuria songarica*	1	27	14	1	
7	沙拐枣 *Calligonum arborescens*			2		
8	沙蒿 *Artemisia desertorum*	1	4	4	2	
9	盐爪爪 *Kalidium foliatum*	1	33	17	4	
10	珍珠猪毛菜 *Salsola passerina*		1	2		
11	紫菀木 *Asterothamnus alyssoides*		3	2		
12	冰草 *Agropyron cristatum*	3				多年生草本
13	芨芨草 *Achnatherum splendens*	2	1	2		
14	苦豆子 *Sophora alopecuroides*	1		1		
15	赖草 *Leymus secalinus*	1				

续表

物种序号 Serial number	优势种 Dominant species	轻度荒漠化 Mild desertification	中度荒漠化 Moderate desertification	重度荒漠化 Severe desertification	极重度荒漠化 Extreme desertification	生长型 Growth form
16	芦苇 *Phragmites australis*	7	4	1		
17	骆驼蓬 *Peganum harmala*	5	4			
18	苜蓿 *Medicago sativa*	4				
19	糙隐子草 *Cleistogenes squarrosa*	2	1			
20	虫实 *Corispermum hyssopifolium*		1			一年生草本
21	狗尾草 *Setaria viridis*	3	1	1		
22	虎尾草 *Chloris virgata*			1		
23	碱蓬 *Suaeda glauca*	5	15	5	1	
24	沙米 *Agriophyllum squarrosum*			3	8	
25	猪毛菜 *Salsola collina*	1				
样地数 The number of sample plos		76	293	180	25	

依据表 2,可获得植物生长状况与土壤质地在不同荒漠化阶段的变化特征,随着荒漠化程度加剧,植被生长状况逐步变差。轻度阶段,植被生长良好的样地占该阶段样地总数的 19.74%,至极重度阶段,已观测不到植株生长较好的样地。轻度和中度阶段,植被生长正常或轻度受限的样地分别有 77.63%和 66.21%,极重度阶段时,植被外在性状受环境胁迫不明显的样地仅占 8%。与此对应,该阶段植被生长发育严重受限的样地占比由轻度荒漠化的 2.63%激增至 92%。

由表 2 可知,随着荒漠化胁迫程度加强,土壤质地表现出明显的粗化特征。轻度阶段,砂土样地仅占 9.21%的比例,砂壤土样地则多达 57.9%,演替至中度阶段,砂壤土样地占比锐减至 2.73%,砂土样地则大幅增加至 83.28%。极重度阶段时,所有样地土壤质地均为砂土。

表 2　不同荒漠化阶段定性指标特征

Table 2　Characteristics of qualitative indicators in different desertification stages

荒漠化阶段 Desertification stages	植被生长状况 Vegetation growth condition	土壤质地 Soil texture
轻度 Mild	G(19.74%); M(77.63%); P(2.63%)	S(9.21%); LS(32.89%); SL(57.90%)
中度 Moderate	G(6.49%); M(66.21%); P(26.85%)	S(83.28%); LS(13.99%); SL(2.73%)
重度 Severe	G(0.56%); M(36.67%); P(62.77%)	S(97.78%); LS(2.22%); SL(0.00)
极重度 Extreme	G(0.00); M(8.00%); P(92.00%)	S(100.00); LS(0.00); SL(0.00)

括号内为该类别占对应荒漠化阶段样地的百分数;G:生长旺盛,发育良好,枝干发达;M:生长受到环境轻度阻碍,但各器官健全,发育正常或轻度受限;P:难以达到正常生长状态,发育严重受限;S:砂土;LS:壤砂土;SL:砂壤土

2.2　不同荒漠化阶段土壤环境因子变化特征

不同荒漠化阶段土壤环境因子的变化规律如表 3 所示,有效土层厚度在 4 种荒漠化阶段均存在差异且达到显著水平($P<0.05$),其中轻度阶段最深,达 43.92cm, 中度和重度阶段次之,极重度阶段最浅,仅有 2.28cm。土壤环境因子中表土砾石含量、风蚀痕迹占地率和坡度在 4 种荒漠化阶段间存在显著差异($P<0.05$),这几个因子水平在极重度阶段达到峰值,分别为 8.64%、81.12%和 6.92°,之后随荒漠化程度减轻而降低。盐碱斑占地率变化特征与表土砾石含量等类似,但仅极重度阶段(9.80%)显著高于其他荒漠化阶段($P<0.05$),轻度、中度和重度阶段间盐碱斑占地率差异不显著($P>0.05$)。分析可得,土壤环境因子中表土砾石含量、风蚀痕迹占地率、坡度以及盐碱斑占地率的变化趋势较一致,均呈现出随荒漠化发展而增加的特征。

表 3 不同荒漠化阶段土壤环境因子变化特征

Table 3 Variation of soil environmental factors in different desertification stages

荒漠化阶段 Desertification stages	有效土层厚度/cm Effective depth of soil layer	表土砾石含量/% Soil surface gravel content	风蚀痕迹占地率/% Wind erosion traces	盐碱斑占地率/% Saline-alkaline land coverage	坡度/(°) Gradient
轻度 Mild	43.92±1.20a	1.74±0.09d	6.04±0.50d	2.72±0.48b	1.16±0.11d
中度 Moderate	27.63±0.58b	4.26±0.19c	20.56±0.58c	3.95±0.37b	2.89±0.12c
重度 Severe	16.24±0.65c	7.16±0.38b	37.99±1.38b	3.41±0.69b	4.27±0.22b
极重度 Extreme	2.28±0.66d	8.64±1.31a	81.12±3.85a	9.80±4.50a	6.92±0.94a

同列不同字母表示差异显著(P<0.05). 数值用平均值±标准误表示

2.3 不同荒漠化阶段植被因子变化特征

植被对荒漠化发展具有较高敏感性,由图 2 可知,不同荒漠化阶段优势种的 3 个指标(株高、盖度、多度)、灌木盖度、草本盖度、植被总盖度以及物种丰富度在荒漠化演替梯度上呈现出相似的变化特征,即随着荒漠化加剧呈明显降低趋势。伴随荒漠化的发展,轻度、中度、重度和极重度阶段优势种株高分别为 98.47、75.6、53.02、32.36cm;优势种盖度分别是 39.68%、26.13%、12.89%和 3.92%;优势种多度分别有 9.86、5.89、3.14 和 1.24; 植被总盖度分别是 56.62%、32.97%、14.29%和 4.00%;物种丰富度分别为 5.34、3.51、1.91 和 1.12。以上 5 种指标在不同荒漠化阶段的差异均达到显著水平(P<0.05)。灌木盖度在轻度(25.24%)和中度(25.06%)阶段差异不显著(P>0.05),其余阶段间存在显著差异(P<0.05)。草本植物盖度在重度(2.85%)和极重度(1.12%)阶段差异不显著(P>0.05),其余阶段间差异显著(P<0.05)。不同于其他植被因子,优势种盖度与植被总盖度的比值随荒漠化的加强呈逐渐增加的规律,且各水平间差异显著(P<0.05)。这种动态变化表明,随着环境胁迫的加剧,优势种在群落中的主导地位趋于增强。

2.4 植被因子与土壤环境因子的 RDA 排序

生态系统中,植被因子受各种环境因子的综合影响,为了直观的表达土壤环境与植被间的相互关系,本研究采用冗余分析(RDA)方法,将选取的土壤环境因子作为解释变量,植被因子作为响应变量,分析两组变量可得植被因子与土壤环境因子的二维排序图(图 3)。图中,土壤环境因子用带有箭头的虚线表示,植被因子用带箭头的实线表示;箭头连线的长度代表环境因子与植被因子间的相关程度,连线越长,代表因子间的关联性越强。环境因子箭头连线在植被因子箭头连线上的垂直投影越长(余弦值越大),其对相应植被因子的影响越大[26,29]。箭头连线与排序轴的夹角代表该因子与排序轴相关性的大小,夹角越小,相关性越高。

由图 3 可知,有效土层厚度(Effective depth of soil layer, Edsl)和风蚀痕迹占地率(Wind erosion traces, Wet)在荒漠化 4 个阶段的箭头连线较长,说明有效土层厚度和风蚀痕迹占地率对植被因子变化特征具有较强的解释能力。具体分析发现,轻度阶段,植被因子箭头连线较为分散,说明各植被因子间关联程度大小不一,存在较大不确定性;有效土层厚度与优势种株高(Plant height, Ph)及优势种盖度(Dominant species coverage, Dc)间夹角很小且箭头方向一致,呈较强的正相关性,是影响优势种株高和优势种盖度的主导因子。中度阶段,各植被因子箭头连线呈集中分布,代表植被因子间关联性明显增强;此外,有效土层厚度对各植被因子呈正相关关系,风蚀痕迹占地率、表土砾石含量(Soil surface gravel content, Sgc)及盐碱斑占地率(Saline-alkaline land coverage, Salc)则表现出负相关性。重度阶段盐碱斑占地率与各植被因子间呈现出一定的正相关,但其箭头连线较短,对植被生长分布的影响有限,其余环境因子和植被因子的关联特征与中度阶段基本一致。极重度阶段,环境因子和植被因子的箭头连线均较为离散,其中,有效土层厚度与草本盖度(Herbaceous coverage, Hc)和植被总盖度(Vegetation coverage, Vc)间呈正相关;表土砾石含量对灌木盖度(Shrub coverage, Sc)、优势种多度(Abundance of dominant species, Ad)产生一定的正效应,这可能与灌木生长的样地多出现在沙砾质戈壁有关。

RDA 排序图(图 3)仅反映土壤环境因子与植被生态因子间存在相关性,难以量化环境因子对植被生长分布的贡献程度。鉴于此,采用向前筛选法和蒙特卡洛检验对 5 个环境因子进行排序,结果表明(表 4):轻度

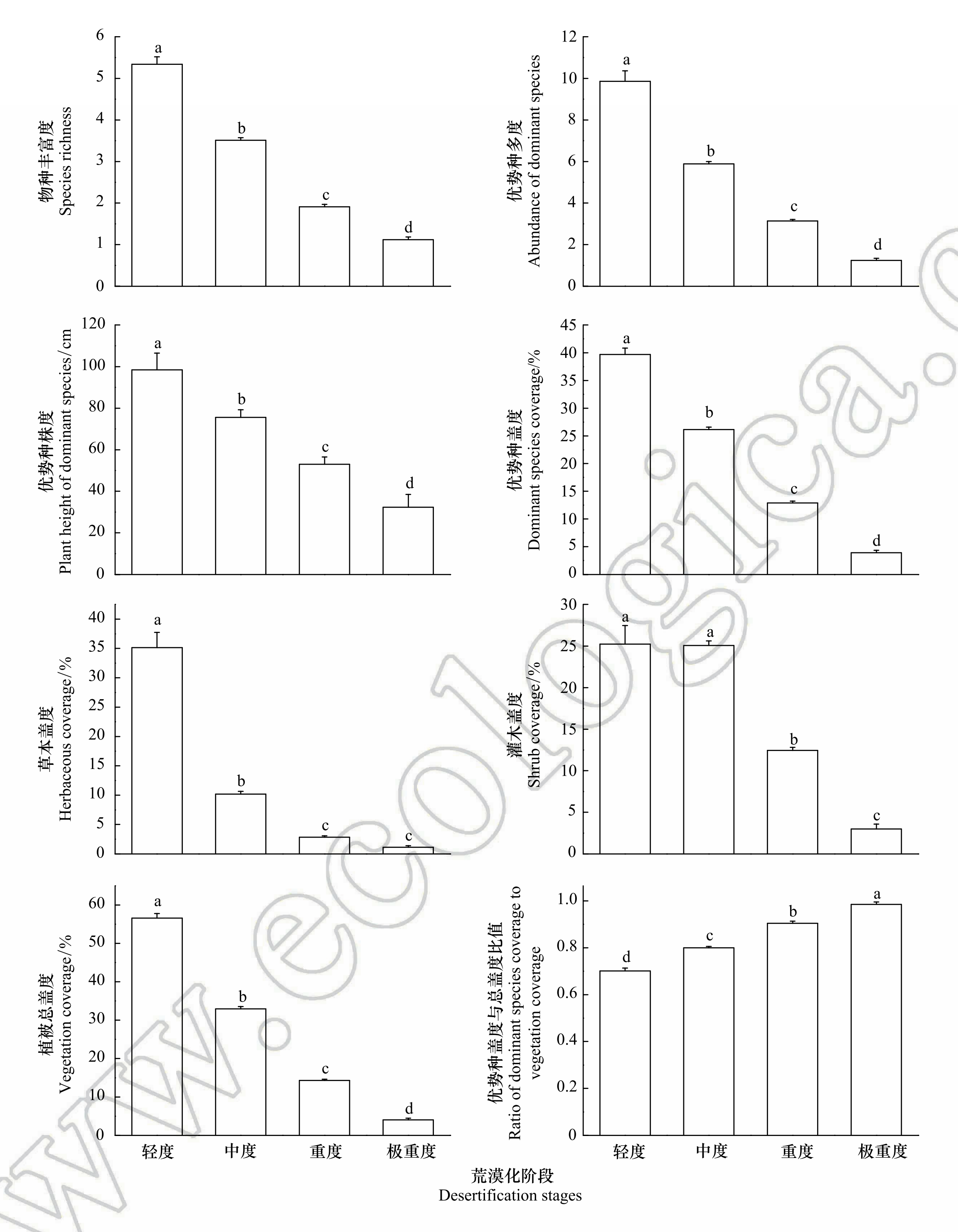


图 2　不同荒漠化阶段植被因子变化特征

Fig.2　Variation of vegetation factors in different desertification stages

不同字母表示差异显著,P<0.05

荒漠化阶段,环境因子对植被生长分布的解释力度由大到小依次为风蚀痕迹占地率、有效土层厚度、坡度、盐碱斑占地率和表土砾石含量,其中风蚀痕迹占地率和有效土层厚度对植被生态特征的影响达到显著水平(P<0.05);中度阶段,环境因子对植被生长分布的解释力度由大到小依次为有效土层厚度、风蚀痕迹占地率、坡度、表土砾石含量和盐碱斑占地率,除盐碱斑占地率外,其余环境因子对植被生态特征均存在显著影响(P<0.05);重度阶段,环境因子解释力度由大到小依次为有效土层厚度、风蚀痕迹占地率、表土砾石含量、盐碱斑

占地率和坡度,其中有效土层厚度与风蚀痕迹占地率对植被生态特征影响显著($P<0.05$);极重度阶段,环境因子解释力度由大到小依次为表土砾石含量、有效土层厚度、盐碱斑占地率、风蚀痕迹占地率和坡度,其中前2个因子对植被生态特征的影响达到显著水平($P<0.05$)。

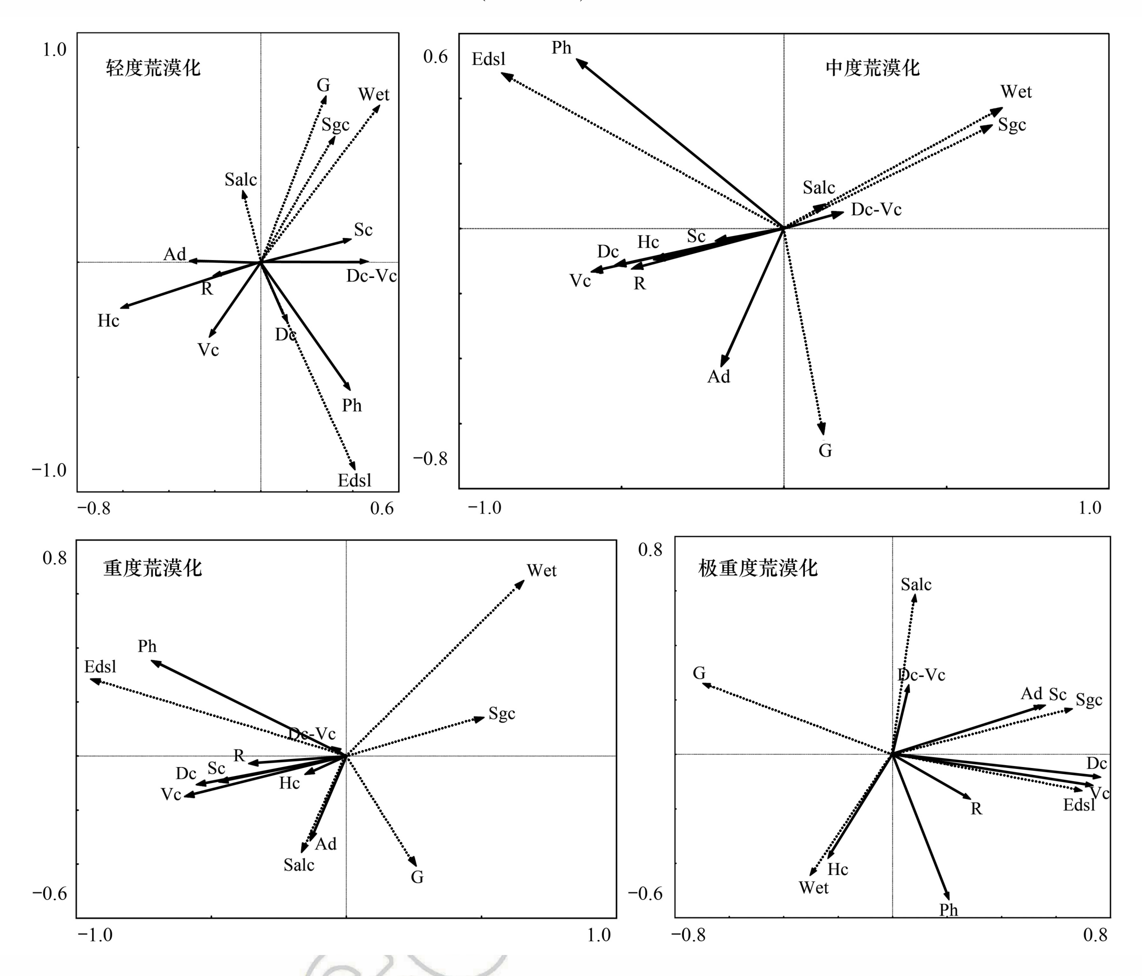


图3 植被因子与土壤环境因子的RDA分析

Fig.3 RDA biplot of vegetation factors and soil environmental factors

Ad:优势种多度,Abundance of dominant species; Dc:优势种盖度,Dominant species coverage; Hc:草本盖度,Herbaceous coverage; Sc:灌木盖度,Shrub coverage; Vc:植被总盖度,Vegetation coverage; Dc-Vc:优势种盖度与总盖度比值,Ratio of dominant species coverage to vegetation coverage; R:物种丰富度,Species richness; Ph:优势种株高,Plant height; Edsl:有效土层厚度,Effective depth of soil layer; Wet:风蚀痕迹占地率,Wind erosion traces; Sgc:表土砾石含量,Soil surface gravel content; Salc:盐碱斑占地率,Saline-alkaline land coverage; G:坡度,Gradient

3 讨论

3.1 荒漠化发展阶段土壤环境因子变化规律

土壤退化是荒漠化的重要特征之一[5-6],随着荒漠化发展,土壤环境因子的退化程度逐渐加重。风蚀痕迹是风蚀强度的直观反映,是风力、植被、地形和土壤物理结构[30]等环境要素综合塑造的地表景象。表土砾石含量则与土壤质地的变化密切相关。本研究中,风蚀痕迹占地比重和表土砾石含量随荒漠化的加剧逐渐增加,说明随着荒漠化发展,地表植被和土壤结皮遭到破坏,土壤抗侵蚀力降低,下垫面长期处于风力的掏蚀破坏作用下[31],最终形成形态各异的风蚀痕迹;同时,由于风对地表土层的分选作用,土壤中黏粉粒大量下降,砂质颗粒比例上升,土壤质地表现出明显的粗化特征,而碎石砾块等则在地表相对富集,导致表土砾石含量增加[32-33]。盐碱斑占地率是土壤盐渍化的主要表征指标之一,本研究中极重度荒漠化阶段盐碱斑占地率显著高于其他阶段,但轻度、中度和重度各阶段间差异不显著($P<0.05$)。可能原因一方面在于这些阶段荒漠化的

主要驱动力为风力因素,另一方面在于土壤中盐分的含量与分布和水盐运移规律密切相关,盐碱斑分布格局受地下水矿化度的强烈影响,少部分极重度样地处于大面积弃耕后的水盐聚集区(图 1),高矿化度地下水的反复提灌造成土体内盐分大量聚集、次生盐渍化成为该区域荒漠化的主导因素。坡度是垂直梯度上的重要地形因子。本研究中坡度随荒漠化发展而增加,主要源于荒漠化正向演替过程中,风对地貌的改造能力加强,风蚀风积作用的加剧引起地表垂直方向空间分异趋于明显。有效土层厚度是土壤发育和演化程度的重要量度[34],一定程度上反映了土壤肥力与微生物活性。本研究表明,随着荒漠化发展阶段的逆转(极重度到轻度),有效土层厚度持续增加, 说明当生境条件改善时,土壤性状向良性方向发展,土壤肥力不断提高[35]。

表 4　不同荒漠化阶段环境解释力度排序和显著性检验结果

Table 4　Explanatory power and significance level of soil environmental factors in different desertification stages

荒漠化阶段 Desertification stages	环境因子 Environmental factors	解释力度排序 Rank ordering of explanatory power	环境因子所占解释量/% Variance explains of environmental factors	*P*	*F*
轻度 Mild	有效土层厚度	2	33.3	0.002	6.31
	风蚀痕迹占地率	1	37.5	0.002	7.74
	表土砾石含量	5	5.4	0.16	1.59
	盐碱斑占地率	4	11.3	0.072	2.54
	坡度	3	12.5	0.072	2.55
中度 Moderate	有效土层厚度	1	56.7	0.002	54.89
	风蚀痕迹占地率	2	21.4	0.002	21.12
	表土砾石含量	4	5.1	0.008	4.5
	盐碱斑占地率	5	2.5	0.064	2.12
	坡度	3	14.3	0.002	16.97
重度 Severe	有效土层厚度	1	72.0	0.002	39.16
	风蚀痕迹占地率	2	17.1	0.002	9.74
	表土砾石含量	3	5.3	0.126	1.88
	盐碱斑占地率	4	2.9	0.17	1.67
	坡度	5	2.7	0.178	1.57
极重度 Extreme	有效土层厚度	2	37.2	0.026	3.67
	风蚀痕迹占地率	4	8.1	0.496	0.79
	表土砾石含量	1	38.5	0.012	4.34
	盐碱斑占地率	3	11.6	0.242	1.33
	坡度	5	4.6	0.566	0.68

3.2　荒漠化发展阶段植被生态特征变化规律

物种多样性是维持生态系统稳定性和功能运行的重要特征,能够度量环境质量[36]。植被生产力是表征植物生态功能稳定性和区域生态承载力的重要指标,可由植被盖度、株高等因子侧面反映[37-40]。生境条件不同,物种多样性分布和植被生产力特征所涉及的指标也不同。本研究选取物种丰富度、植被总盖度、优势种盖度、草本盖度、灌木盖度、优势种株高等植被因子,客观描述了荒漠化发展阶段植被的生态特征变化规律。具体表现为,物种丰富度、植被总盖度、灌木盖度、草本盖度以及优势种多度、盖度和株高均呈现出随荒漠化发展显著下降的特征,表明随着荒漠化程度加剧,生态环境中能量和资源分布产生空间分异,不同生境间资源比率加大,群落所需的养分资源大量流失且被限定在少数区域内,种群生态位宽度增加,各物种间出现较大比例的生态位重叠,造成物种对环境资源的竞争加剧,大量生产力更高、生态功能性更佳但适应性较差的多年生草本植物被少数更耐旱适生的旱生、超旱生植被所替代,从而导致物种丰富度下降和植被生产力降低。分析还发现,在轻度至中度阶段,灌木盖度变化轻微, 且优势种组成差异较小,说明灌木较其他生长型植被具有更宽的生态位和更强的适应性,能够通过改变生长策略和资源分配方式来应对环境胁迫[41-42]。具体表现为灌木具

有较适应干旱气候的叶片和相对发达的根系,能够迅速占据优势生态位,在光资源和水资源的竞争中处于优势[43]。生境内有限的资源被灌木大量利用,加剧了对其他低矮植物的竞争排斥效应,导致在轻度胁迫阶段(轻度和中度荒漠化),灌木在群落中的主导地位更加突出。不同于其他指标,优势种盖度和植被总盖度比值随荒漠化加剧逐步提高,主要源于随着土壤和植被退化加剧,物种丰富度下降,群落结构倾向于简单化,优势种的重要性相对增加。

3.3 不同荒漠化阶段土壤环境因子与植被因子的相互作用

植被与环境间的关系和环境变化对植被分布与格局的影响一直是生态学研究的重点[44-45],随着荒漠化发展,植被与环境的关联性也相应发生改变。本研究所有土壤环境因子中,有效土层厚度在 4 种荒漠化发展阶段与植被因子间相关性均达到显著水平(P<0.05),这表明有效土层作为土壤营养元素和水分的重要载体,其深浅反映了养分含量的高低,而植被在养分利用上存在偏好性,当营养供给水平提高时,物种间竞争排斥效应降低,利于外来植被迁徙和定居,有效的提升了物种丰富度,同时依照生态位互补效应,生物多样性增加有利于物种充分释放资源利用潜力,使资源利用效率达到最大化,从而导致植被生产力提高。此外,有效土层厚度限制着植被根系的生长,有效土层厚度越深,植被根系生长潜力越大[34]。除极重度阶段,风蚀痕迹占地率与植被因子间同样存在强关联性(P<0.05)。这主要源于土壤风蚀是近地表气流与土壤物质间相互作用的结果,植被通过覆盖地表和提高空气动力学粗糙度来减弱风对土壤的侵蚀作用[46],反之,风蚀强度减弱利于细土物质积累和凋落物的留存,为植被的定居和繁衍创造了条件。表土砾石含量在中度和极重度阶段能够强烈影响植被生态格局,可能原因是中度阶段属于土壤质地变化最强烈的区域,砂土和砂壤土样地占比与其他荒漠化阶段间差异明显(表 2),而极重度阶段多为流动沙丘和沙砾质戈壁,植被生长分布存在明显的生境异质性。坡度在垂直方向上影响土壤有机质和水分的分布,是引起植被空间分异的重要地形因子[47], 但本研究中仅在中度阶段与植被因子存在显著相关性(P<0.05),其可能原因是,坡度导致的土壤养分迁移,不仅表现在垂直方向的重力作用上,同时与风力强度、植被凋落物产量密切相关[48],中度阶段的这些环境要素在坡度影响下,产生的资源再分配效应较强,最终强烈的影响了植被的分布。综上可见,在中度荒漠化阶段,土壤环境因子的微小变动即可引起植被生态特征的剧烈变化,这一现象预示中度阶段属于荒漠化发展的不稳定时期,外界环境的扰动将加速其正向或逆向演替。

3.4 不同荒漠化阶段的防治策略

荒漠化发展阶段不同,其治理策略也不同。科学的治理方案是区域内生态经济可持续发展的先决条件,而治理对策不合理,不仅达不到荒漠化防治的预期目标,甚至将导致荒漠化正向演替加速,生态环境进一步恶化。如在风蚀剧烈、有效土层厚度较浅的重度或极重度区域开展人工植苗,短期内可能会产生一定的防风固沙效果,但由于下垫面土壤发育不完全,质地粗糙,难以留存足够的水分和养分供植被利用,最终导致植被因缺水而衰败,荒漠化趋于加剧。本研究发现,不同荒漠化阶段植被因子对土壤环境因子变化的敏感性为中度最高,轻度和重度次之,极重度最低(表 4)。可以预期,通过一定的人工干预(如生物和非生物防风固沙措施)限制荒漠化驱动因素和改善土壤环境因子,其产生的防治效果,中度阶段最佳,极重度最差。鉴于此,从荒漠化防治的必要性和可行性角度分析,中度荒漠化阶段的投入产出比最高,宜采取措施重点治理。轻度荒漠化阶段生境状况相对较好,优势种多为浅根系的多年生草本植物,说明该阶段土壤水分胁迫较轻,对水分的需求程度不及中度阶段。不同于其他区域,民勤荒漠绿洲过渡带无自产地表径流,唯一的地表水资源来自境外的石羊河,水资源短缺问题尤为严重[23,49],如何高效的调配水资源已成为遏制荒漠化的重要手段[22-23,50]。对此,应在荒漠化防治过程中,将较多的水资源分配到中度荒漠化区域,同时兼顾轻度荒漠化区域,确保区域内生态环境得以维持和改善。相对而言,在重度,特别是极重度阶段,则不宜过多的投入资源进行干预。

4 结论

以第五次全国荒漠化和沙化监测项目为依托,通过对民勤荒漠绿洲过渡带 4 种不同荒漠化发展阶段植被

生态特征和土壤环境因子的变化规律与相互关系的研究,得到以下结论:

1)随着荒漠化的加剧,样地优势种生长型逐渐由多年生草本植物演替为灌木和一年生草本植物,植被中白刺的适生性和抗胁迫能力较强,在不同荒漠化阶段均有分布。

2)土壤环境因子中,有效土层厚度随荒漠化发展而逐渐降低,且各阶段间差异显著($P<0.05$)。表土砾石含量、风蚀痕迹占地率、坡度以及盐碱斑占地率的变化趋势较一致,均呈现出随荒漠化发展而增加的特征。

3)植被因子中,优势种(株高、多度、盖度)、草本盖度、灌木盖度、植被总盖度以及物种丰富度均随荒漠化的发展而降低,其中优势种(株高、盖度、多度)、植被总盖度和物种丰富度在不同荒漠化阶段间差异显著($P<0.05$)。

4)RDA 分析发现,土壤环境因子中,有效土层厚度在不同荒漠化阶段与植被因子的相关性均达到显著水平($P<0.05$),是影响植被生长分布的主导因子,应作为今后荒漠化监测重点关注的环境要素。除极重度阶段,风蚀痕迹占地率在的其他荒漠化发展期对植被因子的影响同样显著。多数土壤环境因子和植被因子在中度荒漠化阶段存在显著相关性($P<0.05$),表明中度阶段植被生态特征对土壤环境因子的变化最为敏感,属于荒漠化演替的"分水岭"时期。

5) 不同荒漠化阶段植被因子对土壤环境因子变化的敏感性为中度最高,轻度和重度次之,极重度最低。从荒漠化防治的必要性和可行性的角度考虑,应将中度荒漠化和轻度荒漠化作为重点阶段给予关注。

应当看到,由于本研究依托于第五次全国荒漠化和沙化监测项目,而该课题属于多区域、大范围的科技普查项目,制定研究指标时在考虑科学性、准确度和适用性的同时需兼顾成本和可操作性等限制因素,因此存在一些不足,具体表现为研究中数据提取方法相对粗糙,环境因子中缺乏土壤水分和地下水埋深数据,植被因子中缺乏伴生种等其他物种的盖度、株高和多度数据,而水分是干旱区和半干旱区最主要的资源限制因子[51],所有物种的盖度、株高和多度是计算重要值和物种多样性指数的基本要素。鉴于此,建议在第六次全国荒漠化和沙化监测项目中,对于某些受人类活动和自然因素强烈作用的生态敏感区,如民勤荒漠绿洲过渡带,应将土壤水分、地下水埋深和多样性指数等关键指标纳入监测范围,以更加完善、精确的量化植被分布与环境要素在荒漠化过程中的内在联系。

参考文献(References):

[1] 贾宝全, 慈龙骏, 蔡体久, 高志海, 丁峰. 绿洲-荒漠交错带土壤水分变化特征初步研究. 植物生态学报, 2002, 26(2): 203-208.

[2] 贾宝全, 慈龙骏. 绿洲景观生态研究. 北京: 科学出版社, 2003.

[3] 王蕙, 赵文智, 常学向. 黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异. 生态学报, 2007, 27(5): 1731-1739.

[4] 田新民, 赵长明, 邓建明, 张晓玮, 陈拓, 任贾文, 王根轩. 沿民勤绿洲荒漠过渡带分布的 4 种优势植物光合生理响应. 草业学报, 2011, 20(4): 108-115.

[5] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势. 中国沙漠, 2009, 29(1): 1-9.

[6] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 张小由, 李玉霖, 刘立超. 我国西北干旱区的荒漠化过程及其空间分异规律. 中国沙漠, 2011, 31(1): 1-8.

[7] 韩福贵, 徐先英, 王理德, 王键, 张应昌, 韩生慧. 民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应. 生态学报, 2013, 33(13): 4156-4164.

[8] 常兆丰, 韩福贵, 仲生年, 张应昌, 李爱德, 何芳兰, 柴成武, 张锦春. 民勤荒漠草场植物群落自然更新和退化演替初探. 草业科学, 2008, 25(8): 13-18.

[9] 张锦春, 王继和, 安富博, 孙涛, 刘有军, 李银科, 肖斌. 民勤天然梭梭种群特征初步研究. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1124-1128.

[10] 陈政融, 刘世增, 刘淑娟, 孙涛. 芦苇和白刺空间格局对青土湖生态输水的响应. 草业科学, 2015, 32(12): 1960-1968.

[11] 宋冬梅, 肖笃宁, 马明国, 王建华. 民勤湖区地下水资源时空变化对灌区景观生态安全的影响研究. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1815-1820.

[12] 段应元, 刘学录. 基于水资源承载力的民勤绿洲土地利用结构优化研究. 中国沙漠, 2011, 31(1): 174-179.

[13] 任珩, 赵成章, 安丽涓. 基于突变级数法的民勤绿洲水资源管理政策绩效评价. 资源科学, 2014, 36(5): 922-928.

[14] 岳东霞, 巩杰, 熊友才, 宋雅杰. 民勤县生态承载力动态趋势与驱动力分析. 干旱区资源与环境, 2010, 24(6): 37-44.

[15] 杨亮洁, 潘晶, 王录仓. 可持续发展观视角下的绿洲生态承载力研究——以民勤绿洲为例. 干旱区资源与环境, 2011, 25(9): 25-31.

[16] 李有斌, 王刚. 民勤荒漠绿洲植被的生态服务功能价值化研究. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 42(1): 44-49.

[17] 石惠春, 赵勇, 杨二俊, 胡青云, 王芳, 梁仲靖. 基于 CVM 的民勤绿洲生态系统服务价值评估. 干旱区资源与环境, 2008, 22(7): 31-36.

[18] 岳东霞, 杜军, 巩杰, 降同昌, 张佳静, 郭建军, 熊友才. 民勤绿洲农田生态系统服务价值变化及其影响因子的回归分析. 生态学报, 2011, 31(9): 2567-2575.
[19] 宫继萍, 石培基, 魏伟, 杨雪梅, 吴文婕. 基于土地利用变化的民勤县土地生态风险研究. 土壤通报, 2012, 43(5): 1029-1035.
[20] 唐嘉琪, 石培基. 民勤土地利用格局时空变化研究. 中国沙漠, 2013, 33(3): 928-936.
[21] 刘世增, 孙保平, 李银科, 富晓松. 石羊河中下游荒漠景观生态变化及调控机制研究. 中国沙漠, 2010, 30(2): 235-240.
[22] Ma J Z, Ding Z Y, Wei G X, Zhao H, Huang T M. Sources of water pollution and evolution of water quality in the Wuwei basin of Shiyang river, Northwest China. Journal of Environmental Management, 2009, 90(2): 1168-1177.
[23] Xue X, Liao J, Hsing Y, Huang C H, Liu F M. Policies, land use, and water resource management in an arid oasis ecosystem. Environmental Management, 2015, 55(5): 1036-1051.
[24] 朱震达. 中国土地荒漠化的概念、成因与防治. 第四纪研究, 1998, 18(2): 145-155.
[25] 国家林业局. 第五次全国荒漠化和沙化监测技术规定. 北京, 2013.
[26] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
[27] 贡璐, 朱美玲, 塔西甫拉提·特依拜, 张雪妮, 韩丽, 解丽娜. 塔里木盆地南缘旱生芦苇生态特征与水盐因子关系. 生态学报, 2014, 34(10): 2509-2518.
[28] 于健, 徐倩倩, 刘文慧, 罗春旺, 杨君珑, 李俊清, 刘琪璟. 长白山东坡不同海拔长白落叶松径向生长对气候变化的响应. 植物生态学报, 2016, 40(1): 24-35.
[29] 朱美玲, 贡璐, 张龙龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析. 环境科学, 2015, 36(7): 2678-2685.
[30] 赵彩霞, 郑大玮, 何文清. 植被覆盖度的时间变化及其防风蚀效应. 植物生态学报, 2005, 29(1): 68-73.
[31] 闫德仁. 浑善达克沙地风蚀坑形态特征及其影响因素. 地理科学, 2016, 36(4): 637-642.
[32] 李森, 李凡, 孙武, 李保生. 黑河下游额济纳绿洲现代荒漠化过程及其驱动机制. 地理科学, 2004, 24(1): 61-67.
[33] 赵哈林, 李玉强, 周瑞莲, 赵学勇, 张铜会, 王进. 内蒙古东部两大沙地土壤理化特性沙漠化演变规律的比较. 地球科学进展, 2011, 26(7): 779-786.
[34] 易晨, 李德成, 张甘霖, 赵玉国, 杨金玲, 刘峰, 宋效东. 土壤厚度的划分标准与案例研究. 土壤学报, 2015, 52(1): 220-227.
[35] Bestelmeyer B T, Okin G S, Duniway M C, Archer S R, Sayre N F, Williamson J C, Herrick J E. Desertification, land use, and the transformation of global drylands. Frontiers in Ecology and the Environment, 2015, 13(1): 28-36.
[36] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 赵学勇. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态. 植物生态学报, 2004, 28(1): 86-92.
[37] 周广胜, 袁文平, 周莉, 郑元润. 东北地区陆地生态系统生产力及其人口承载力分析. 植物生态学报, 2008, 32(1): 65-72.
[38] 袁文平, 蔡文文, 刘丹, 董文杰. 陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展. 地球科学进展, 2014, 29(5): 541-550.
[39] 常兆丰, 段小峰, 韩福贵, 仲生年, 王强强, 张剑挥. 民勤荒漠区主要植物群落的稳定性及生态效应. 西北植物学报, 2014, 34(12): 2562-2568.
[40] 王静, 程积民, 万惠娥, 方锋. 厚穗宾草地上部生物量与株高的分形关系. 西北植物学报, 2005, 25(8): 1623-1627.
[41] Norby R J, Todd D E, Fults J, Johnson D W. Allometric determination of tree growth in a CO_2-enriched sweetgum stand. New Phytologist, 2001, 150(2): 477-487.
[42] Harpole W S, Potts D L, Suding K N. Ecosystem responses to water and nitrogen amendment in a California grassland. Global Change Biology, 2007, 13(11): 2341-2348.
[43] 毛伟, 李玉霖, 崔夺, 赵学勇, 张铜会, 李玉强. 沙质草地不同生活史植物的生物量分配对氮素和水分添加的响应. 植物生态学报, 2014, 38(2): 125-133.
[44] Phillips O L, Vargas P N, Monteagudo A L, Cruz A P, Zans M E C, Sánchez W G, Yli-Halla M, Rose S. Habitat association among Amazonian tree species: a landscape-scale approach. Journal of Ecology, 2003, 91(5): 757-775.
[45] 郑超超, 伊力塔, 张超, 余树全, 库伟鹏, 钱逸凡, 凌骅. 浙江江山公益林物种种间关系及 CCA 排序. 生态学报, 2015, 35(22): 7511-7521.
[46] 刘艳萍, 刘铁军, 蒙仲举. 草原区植被对土壤风蚀影响的风洞模拟试验研究. 中国沙漠, 2013, 33(3): 668-672.
[47] 袁铁象, 张合平, 欧芷阳, 谭一波. 地形对桂西南喀斯特山地森林地表植物多样性及分布格局的影响. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2803-2810.
[48] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 陈翔舜, 王小军, 云建英. 科尔沁沙地沙丘生境单元凋落物运移特征. 中国沙漠, 2016, 36(1): 167-173.
[49] 戴晟懋, 邱国玉, 赵明. 甘肃民勤绿洲荒漠化防治研究. 干旱区研究, 2008, 25(3): 319-324.
[50] 薛娴, 王涛, 姚正毅, 彭国川. 从石羊河流域沙漠化土地分布看区域协调发展. 中国沙漠, 2005, 25(5): 682-688.
[51] Bai Y F, Wu J G, Pan Q M, Huang J H, Wang Q B, Li F S, Buyantuyev A, Han X G. Positive linear relationship between productivity and diversity: evidence from the Eurasian Steppe. Journal of Applied Ecology, 2007, 44(5): 1023-1034.